

# Коррекция ошибки угловой координаты круговых записывающих лазерных систем при изготовлении дифракционных структур с произвольной топологией

В.Н. Хомутов<sup>1</sup>, Р.В. Шиманский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН, пр. академика Коптюга 1, Новосибирск, Россия, 630090

**Аннотация.** Дифракционные оптические элементы с произвольной топологией широко применяются в различных отраслях современной науки и техники. Значительная часть современной дифракционной оптики производится методом кругового растрового сканирования при помощи установок типа CLWS-300. Одной из остро стоящих проблем данного типа установок является точность работы угловой координаты. В данной работе проведён анализ ошибок угловой координаты, предложен метод их контроля, а также рассмотрена возможность их коррекции.

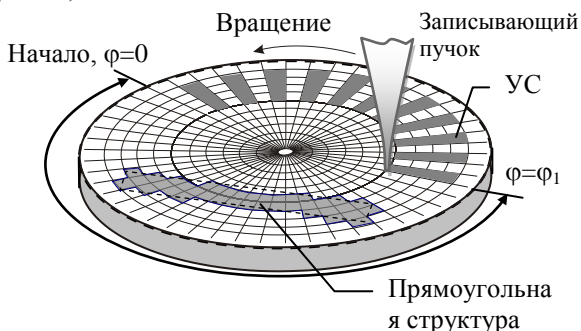
## 1. Введение

Одним из наиболее перспективных способов синтеза дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с произвольной топологией структур таких как компьютерные голограммы, круговые и линейные шкалы и сетки, зонные пластинки и оптические компоненты для волновых и геометрических преобразований световых пучков, является метод кругового растрового сканирования (КРС). Этот метод представляет собой запись структур сфокусированным лазерным пучком в полярной системе координат. На протяжении многих лет этот способ успешно реализуется с помощью круговых лазерных записывающих систем (КЛЗС) таких как CLWS-200, CLWS-300 [1]. КЛЗС этого класса способны создавать микроструктуры на образцах до Ø300 мм и при этом угловая погрешность (PV) записи не превышает  $\delta\alpha=0.5-1$  угл. сек., а радиальная погрешность составляет менее  $\delta r=0.1$  мкм. Однако в процессе изготовления ДОЭ методом КРС возможны следующие виды систематических погрешностей: погрешность совмещения записывающего лазерного пучка с центром вращения оптической подложки, погрешность траектории вращения шпинделя, погрешность определения текущего значения угла поворота шпинделя и т.д. [2]. На данный момент разработаны методы, позволяющие минимизировать влияние этих погрешностей на результат записи [3]. Ошибки угловой координаты могут быть как систематическими, вызванными сбоями при работе системы, так и случайными, вызванными различными внешними факторами (изменения температуры, воздушные потоки и т.д.).

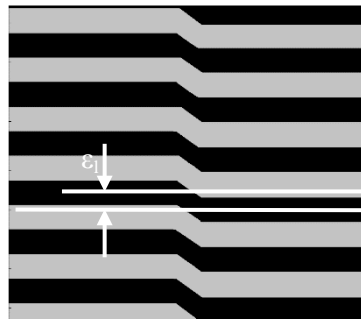
Предлагаемый в данной работе метод позволяет оперативно определить наличие и величину систематических и случайных ошибок угловой координаты. Кроме того, используя данный метод появляется возможность коррекции процесса записи для уменьшения влияния систематических ошибок угловой координаты. Коррекция ошибок угловой координаты крайне важна для записи ДОЭ большого диаметра содержащих структуры произвольной топологии, поскольку для таких элементов есть вероятность возникновения критических ошибок в работе угловой координаты, вызванных предельными случаями ориентации структур относительно записывающего пучка.

## 2. Метод кругового растрового сканирования

При записи методом КРС, подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью ( $10-15 \text{ с}^{-1}$ ), в то время как сфокусированное ( $\sim 0.5 \text{ мкм}$ ) записывающее пятно лазера перемещается вдоль прямой линии пересекающей центр вращения (Рис.1).



**Рисунок 1.** Запись микроструктуры в полярной системе координат.



**Рисунок 2.** Погрешность координаты записи.

КРС реализуется методом дискретного перемещения записывающего пятна в радиальном направлении (шаг записи  $S=0.25-0.5 \text{ мкм}$ ). Этот метод сканирования удобно применять и для синтеза ДОО с произвольной топологией. На рис.1 показаны направления движения записывающего пятна, адресные сетки для кругового сканирования в полярной системе координат и примеры записываемых структур (типичная угловая структура и прямоугольная структура). Методом КРС с максимальной точностью записываются круговые и радиальные структуры, в то время как произвольные структуры, за счет дискретизации, записываются с неровными краями. Максимальная погрешность записи равна шагу дискретизации в радиальном и угловом направлениях. В радиальном направлении эта погрешность равна шагу записи  $S$ . В угловом направлении величина дискретизации определяется количеством позиций угловой адресной сетки КЛЗС ( $N=2-4 \cdot 10^6$ ) [4] и зависит от радиуса записи.

Смещение записанной зоны ДОО относительно ее расчётного положения обычно называется искажением структуры. Адрес записи произвольной ячейки  $i$  в полярной системе координат определяется как  $P_i(r_i, \phi_i)$ , где  $r_i$  - радиус записи (расстояние от оси вращения шпинделя до центра лазерного записывающего пятна),  $\phi_i$  - угловая координата записи (определяется как разность между началом угловой координаты ( $\phi = 0$ ) и текущим угловым положением вращающегося стола). В процесс записи рассчитанная структура переносится на подложку с некоторой погрешностью[5]. Эта погрешность имеет две составляющие: 1) Конечное расстояние между расчетной  $P_i(r_i, \phi_i)$  и записанной  $P_i'(r_i', \phi_i')$  координатами точек, следовательно,  $\epsilon_i = P_i(r_i, \phi_i) - P_i'(r_i', \phi_i')$  - погрешность координаты записи рис.2; 2) Разница между расчетным и реально записанным размером, и формой элементарной ячейки (погрешность размера). Абсолютная погрешность координаты  $\epsilon_i$  зависит от точности перемещения лазерного пучка относительно подложки. Эта погрешность после записи приводит к появлению дополнительного сдвига фазы волнового фронта, прошедшего через структуру ДОО. Фазовый сдвиг аналогичен сдвигу фазы, обусловленному нарушением периодичности штрихов в обычной дифракционной решетке и вызывающему появление паразитных порядков дифракции, называемых. Фазовый сдвиг волнового фронта (в долях длины волны света,  $\lambda$ ) может быть определен как:

$$W = m\lambda \frac{\epsilon_i}{T}, \quad (1)$$

где  $m$  - порядок дифракции;  $T$  - период дифракционной структуры в данной области ДОО;  $\epsilon_i$  - погрешность координаты записи (область с координатами  $r_i, \phi_i$ ) в направлении перпендикулярном зонам ДОО.

Погрешность угловой координаты является специфической для КЛЗС. Угловая координата представляет собой подсистему, состоящую из шпинделя на аэростатических подшипниках, прецизионной угловой шкалы, датчиков углового положения и начала оборота, аппаратных средств для управления и контроля разгоном, торможением и равномерным вращением

шпинделя. Во время работы шпиндель равномерно вращается с заданной скоростью, которая постоянна на протяжении всего процесса записи дифракционных структур или микроизображений. Равномерность вращения обеспечивается аппаратными средствами с использованием обратной связи датчиков углового положения, установленных на прецизионной угловой шкале. Несмотря на наличие следящей системы, равномерность вращения шпинделя не идеальна и вносит ошибки в процесс записи дифракционной структуры. Датчики углового положения шпинделя КЛЗС формирует электрические импульсы, следующие через каждые  $0.0125^\circ$ . Умножитель частоты следования импульсов, выполненный на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), увеличивает угловое разрешение в 50-100 раз, вплоть до  $\delta\phi = 0,1-0,25$  угл. сек. Текущая угловая координата  $\phi_i$  записи определяется подсчетом числа  $n_i$  выходных импульсов этой системы, как разница между началом угловой координаты ( $\phi = 0$ ) и текущим угловым положением вращающегося стола:

$$\varphi = n_i \delta\phi, \quad (2)$$

где  $\delta\phi = 2\pi/N$  - величина одного отсчёта угловой координаты;  $N$  - количество импульсов на один оборот шпинделя на выходе умножителя частоты. Погрешность угловой координаты определяется следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i-1}, \quad (3)$$

Величина погрешности угловой координаты связана с линейной ошибкой  $E_i$  (в тангенциальном направлении) следующим образом:

$$E_i = r_i \Delta\varphi_i, \quad (4)$$

Источниками ошибок является неравномерность интервалов  $\delta\phi$ , вызванная вибрацией шпинделя, электрическими шумами, вносимыми системой ФАПЧ, погрешностью датчика угла поворота и т.д. Погрешность угловой координаты представляет собой периодическую функцию (период - угол поворота шпинделя на  $360^\circ$ ) и может быть представлена рядом Фурье. Ошибка в фиксации начала координат угловой шкалы датчика приводит к появлению первой гармоники функции распределения погрешности угловой координаты. Экспериментальные исследования КЛЗС показали, что типичная среднеквадратичная величина погрешности угловой координаты не превышает долей угловой секунды.

### 3. Интерферометрический метод контроля ошибки угловой координаты

Контроль погрешности угловой структуры подразумевает оценку погрешности нанесения дифракционной структуры на оптическую подложку относительно расчётных данных. Как правило для решения этой задачи применяются лазерные гониометры и специальные углоизмерительные установки такие как АС-700 (ФГУП ПО УОМЗ) [5], они позволяют оценить погрешность порядка 0.5-1 угл. сек. Для оперативного контроля погрешности угловых структур предложен интерферометрический метод [6]. Интерферометр Физо с фазовым сдвигом позволяет контролировать форму плоского или сферического волновых фронтов с погрешностью порядка  $\lambda/1000$ . При установке, изготовленной с помощью КЛЗС дифракционной решетки (ДР) по автоколлимационной схеме (Рис. 3) под углом Литтрова интерференционная картина искажается, если угловая координата КЛЗС имеет погрешность, см. выражения (1) и (4). Для обеспечения возможности анализа по площади предложено использовать ДОО представляющий систему двух линейных решёток, повернутых под углом  $90$  градусов друг относительно друга.

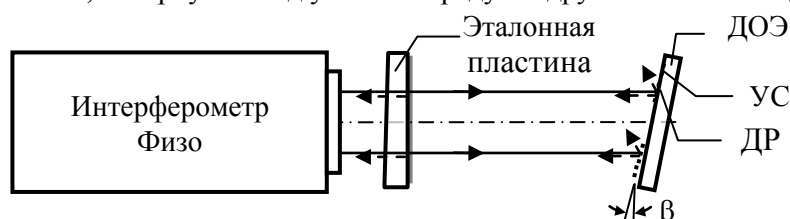


Рисунок 3. Схема интерференционного метода контроля ошибки угловой координаты.

При интерферометрическом контроле необходимо выделить соответствующий дифракционный порядок, провести измерение и сшить полученные результаты. Предлагаемая

система позволяет контролировать погрешность угловой координаты КЛЗС с помощью обычных серийных интерферометров, не прибегая к использованию уникальных прецизионных углоизмерительных машин и гониометров. Это позволяет оперативно проводить контроль точности угловой координаты КЛЗС.

#### 4. Коррекция ошибки угловой координаты

Неравномерность вращения шпинделя КЛЗС не является полностью произвольной, а имеет систематическую угловую ошибку и относится к типу систематических ошибок. Проблема коррекции ошибки угловой координаты решается за счёт возможности внесения программных поправок в процесс записи. Определение этих программных поправок основано на описанном интерференционном методе. Для проведения калибровки записывается специальный тестовый элемент, содержащий дифракционную решётку, после чего полученный элемент тестируется интерферометром. На основе результатов тестирования формируется таблица погрешностей угловой координаты для корректировки процесса работы угловой координаты записывающей установки.

Таблица погрешностей угловой координаты  $E$  представляет собой набор пар значений  $E[\phi, \Delta\phi]$ , где  $\phi$  – угол в радианах,  $\Delta\phi$  – измеренная ошибка угловой координаты в угловой точке  $\phi$  в радианах. Функция расчета ошибки для произвольного угла производится по формуле:

$$\Delta\phi_c = f_c(\phi_c, E[\phi, \Delta\phi]), \quad (5)$$

где  $\phi_c$  – угол расчета погрешности,  $E[\phi, \Delta\phi]$  – таблица измеренных погрешностей,  $f_c$  – функция расчета ошибки в радианах для угла  $\phi_c$ , например, линейная интерполяция по табличным значениям  $\Delta\phi_i, \Delta\phi_{i+1}$  в заданном угловом положении  $\phi_c, \phi_i < \phi_c < \Delta\phi_{i+1}$ .

Промежуточными расчетными данными при записи на круговых лазерных записывающих системах является упорядоченный непересекающийся набор векторов (дуг)  $V$  в формате  $V_i[\phi_b, \phi_e, f_p(\phi_b, \phi_e)]$ , где  $V_i$  – вектор (дуга) с угловыми координатами  $\phi_b, \phi_e$  – соответственно начало и конец дуги в радианах,  $f_p(\phi_b, \phi_e)$  – функция уровня мощности записываемого пучка. При этом  $\phi_b \leq \phi_e$  для всех  $V_i$ . Данные рассчитываются последовательно для текущего радиуса записи  $R$ .

Алгоритм коррекции ошибки неравномерности вращения угловой координаты производит перерасчет набора векторов (дуг)  $V$  для текущего радиуса  $R$  в скорректированный по углу набор данных  $V_{ci}[\phi_{cb}, \phi_{ce}, f_p(\phi_{cb}, \phi_{ce})]$  по формулам:

$$\begin{aligned} \phi_{C_b} &= \phi_b + f_c(\phi_b, E[\phi, \Delta\phi]) \\ \phi_{C_e} &= \phi_e + f_c(\phi_e, E[\phi, \Delta\phi]), \end{aligned}$$

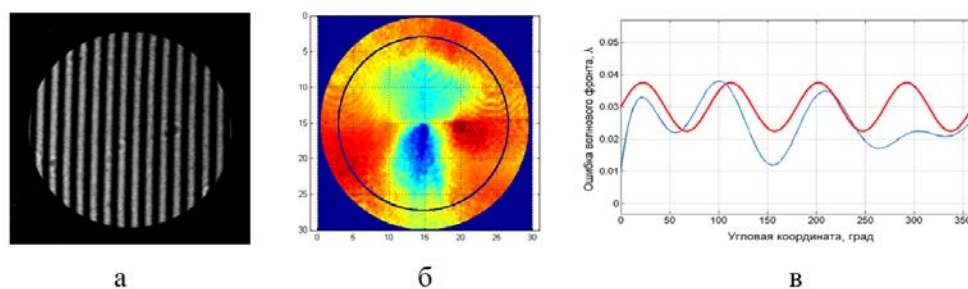
где  $\phi_b, \phi_e$  – исходные угловые координаты дуги  $V_i$  промежуточных расчетных данных,  $\phi_{cb}, \phi_{ce}$  – скорректированные угловые координаты дуги  $V_{ci}$ ,  $f_c$  – функция расчета погрешности для заданного угла.

#### 5. Экспериментальные результаты

Специальный тестовый ДОЭ с периодом  $T = 5$  мкм и диаметром 50 мм был изготовлена на ситаловой подложке диаметром 60 мм с плоскостностью  $0.08\lambda$  (PV) и  $0.013\lambda$  rms методом прямой лазерной записи по пленке хрома. Шаг записи в радиальном направлении 0.5 мкм. Количество позиций угловой адресной сетки –  $2.8 \cdot 10^6$ . В процесс записи была внесена синусоидальная ошибка угловой координаты с амплитудой 1.5 угл. сек.

Контроль дифрагированного волнового фронта проводился с помощью интерферометра Физо FTI-100 с эталонной пластиной (CVI,  $\lambda/100$ ) по схеме, приведенной на рис. 1. На рис. 4 приведены результаты экспериментального исследования погрешности изготовления ДР.

Графики внесённой и измеренной ошибок имеют качественное совпадение. Несовпадения этих графиков могут быть вызваны влиянием подложки, которые в последствие можно будет исключить, комбинируя фазовые карты  $\pm 1$  и 0-го порядков дифракции.



**Рисунок 4.** Интерферограмма (а), карта волнового фронта и профиль(б), сечение ошибки угловой координаты (в).

## 6. Заключение

Одна из приоритетных задач дифракционной оптики – повышение точности изготовления микроструктур. Поэтому крайне важна разработка оперативных прецизионных методов оценки ошибок записи профиля. Предложенный интерферометрический метод позволяет не только оперативно выполнять измерение ошибок дифракционного профиля, записанного методом КРС, но также даёт возможность производить коррекцию ошибки угловой координаты записывающих систем для минимизации присутствующих систематических ошибок. Одним из преимуществ данного метода является простота его реализации и отсутствие необходимости применения метрологических углоизмерительных установок.

Дальнейшее развитие метода подразумевает повышение точности определения ошибки за счёт получения фазовых карт различных порядков дифракции и последующего вычитания из фазовой карты структуры погрешности вносимых подложкой тестового ДОЭ.

## 7. Литература

- [1] Poleshchuk, A.G. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure/ A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, V. P. Kyrianov // *Apl. Opt.* – 1999. – Vol. 38. – P. 1295-1301.
- [2] Коронкевич, В.П. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // *Компьютерная оптика.* – 1997. – Т. 17. – С. 63-74.
- [3] Полещук, А.Г. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных оптических элементов в процессе изготовления / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.Н. Хомутов, А.С. Конченко // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40, №6. – С. 818-829. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-818-829.
- [4] Коронкевич, В.П. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат - анализ погрешностей изготовления и их измерение / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // *Автометрия.* – 1997. – Т. 6. – С. 42-56.
- [5] Кирьянов, В.П. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) // *Оптический журнал.* – 2007. – Т. 74, №12. – С. 40-49.
- [6] Хомутов, В.Н. Интерферометрический метод контроля изготовления угловых шкал / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, Р.К. Насыров // *Международная конференция «Прикладная оптика».* – 2012. – Т. 3. – С. 26-30.

# **Error correction of the angular coordinate of circular laser writing systems in the diffraction structures manufacture with arbitrary topology**

**V.N. Khomutov<sup>1</sup>, R.V. Shimansky<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>IA&E SB RAS, Academician Koptyug ave. 1, Novosibirsk, Russia, 630090

**Abstract.** One of the most perspective technique fabrications of diffractive optical elements (DOE) is circle raster scanning technique. The technique is implemented using laser writing system such as CLWS-300. In this paper, we propose a method of error characterization and correction of the angular coordinate to improve the accuracy of writing for polar coordinate writing system.

**Keywords:** diffractive optics, laser image generation, direct laser writing, polar coordinate writer, fabrication errors.